

Polytech'Orléans



Estudio de las interacciones de las estelas de los aerogeneradores en un parque eólico.



Jose A. Rodríguez Irastorza
Ingeniería Industrial, Tecnologías energéticas

Proyecto fin de carrera 2009
Departamento de Ingeniería térmica y de fluidos

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	2
2.	MATERIAL EXPERIMENTAL	3
2.1.	EL TUNEL DE VIENTO MALAVARE	3
2.2.	MEDIDA DE LA VELOCIDAD POR LASER, LDA.	3
2.3.	MODELIZACIÓN DE LOS AEROGENERADORES.....	5
2.4.	DETERMINACIÓN DEL MALLADO UTILIZADO	5
3.	CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO.	6
3.1.	EVOLUCIÓN DEL FLUJO EN EL TUNEL DE VIENTO.	6
3.1.1.	MEJORAS APORTADAS AL TUNEL DE VIENTO.	6
3.1.2.	FLUJO SIN LA MAQUETA.....	6
3.1.3.	FLUJO CON LA MAQUETA MONTADA.....	7
3.2.	LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA	8
3.2.1.	LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA	8
3.2.2.	INTENSIDAD DE LA TURBULENCIA.	8
4.	DESCRIPCIÓN DE LAS MEDIDAS.	9
5.	INTERACCIONES DE LAS ESTELAS DE LOS AEROGENRADORES SIN LA MAQUETA.	9
5.1.	PERFIL VERTICAL.....	9
5.2.	PERFIL HORIZONTAL	10
6.	INTERACCIÓN DE LAS ESTELAS DE LOS AEROGENERADORES EN PRESENCIA DE UN RELIEVE.....	10
6.1.	PERFIL VERTICAL.....	10
6.2.	PERFIL TRANSVERSAL.	11
7.	COMPARACIÓN CON Y SIN MAQUETA.....	11

1. INTRODUCCIÓN

Un aerogenerador extrae la energía cinética del viento con el fin de convertirla en energía eléctrica. Esta extracción de la energía conlleva la creación de una estela por detrás del aerogenerador. Un déficit de velocidad aparece entre el anverso y el reverso del aerogenerador.

Los aerogeneradores se organizan en parques eólicos con el fin de extraer la máxima cantidad de energía posible de una zona con unas condiciones propicias para ello. El objetivo de nuestro proyecto es estudiar las interacciones entre las estelas de los aerogeneradores en un parque eólico.

En concreto, el parque que llevaremos a estudio es uno situado al sur de Francia. Pertenece a la empresa EDF (Electricidad de Francia) y son ellos quienes han encargado un ensayo en túnel de viento al instituto PRISME cuyas oficinas se encuentran anejas a la Universidad Politécnica de Orleans. Estos ensayos nos permitirán cuantificar los efectos de la interacción entre las estelas de los aerogeneradores. La siguiente foto nos muestra el parque eólico estudiado.

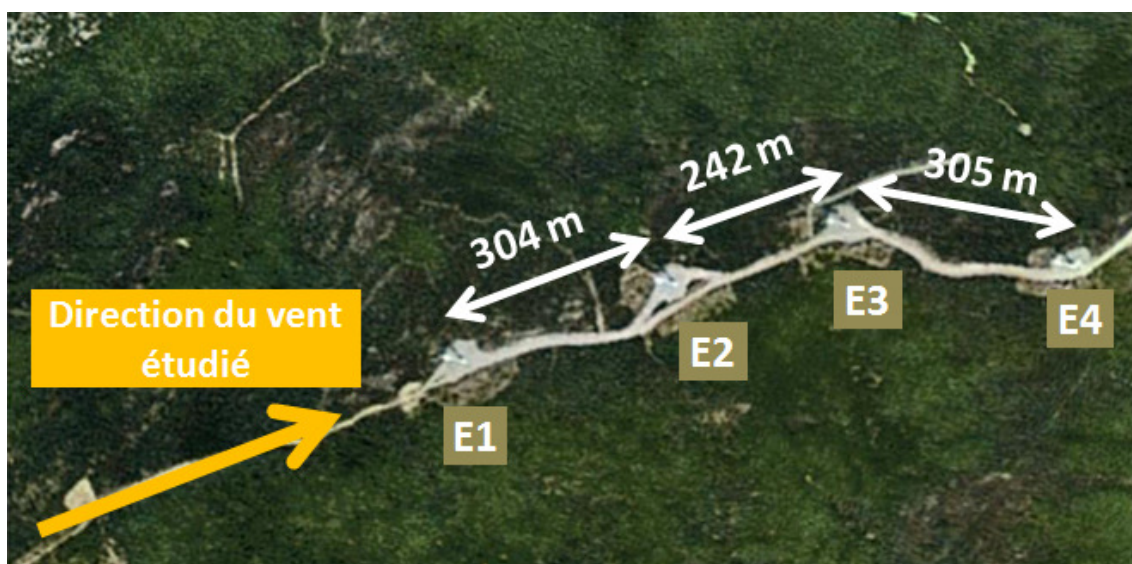


Figura 1 : Fotografía aérea del parque eólico estudiado.

EDF ha pedido que el estudio se realice sobre un viento proveniente de una dirección concreta, oeste-suroeste, que es aquella que deja a los tres primeros aerogeneradores alineados y en la que se presenta una mayor interacción entre las estelas de los aerogeneradores.

2. MATERIAL EXPERIMENTAL

2.1. EL TUNEL DE VIENTO MALAVARE

Los ensayos se llevarán a cabo en el túnel de viento Malavard del instituto PRISME. Se trata de un túnel de una potencia de 250 megavatios capaz de generar una velocidad máxima de 60 m/s en el menor de sus vanos. Para nuestro proyecto y de acuerdo con el viento del parque eólico, vamos a utilizar una velocidad de 10 m/s en el vano de retorno, el mayor de los vanos.

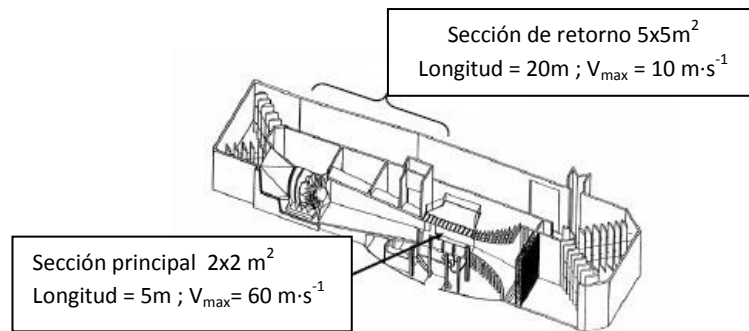


Figura 2 : Túnel de Viento Malavard.

2.2. MEDIDA DE LA VELOCIDAD POR LASER, LDA.

El anemómetro utilizado para este fin es el del Laser Doppler o LDA. Esta es una tecnología utilizada para medir la velocidad de fluidos o mejor dicho, de pequeñas partículas en un lecho fluido. Se basa en la medida de la radiación difusa de un laser a su paso por un fluido en el que se han inyectado partículas que crean un espectro de interferencias. La difusión del laser oscila con una frecuencia que se asocia con la velocidad de las partículas y con ello con la velocidad del fluido.

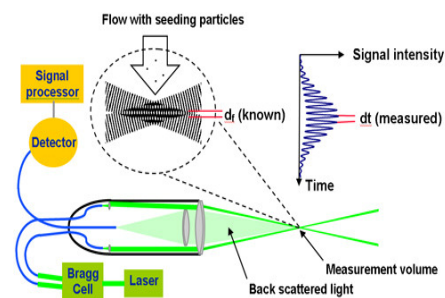


Figura 3 : Principio del LDA

El contexto teórico del LDA está fundamentado sobre las teorías relativistas clásicas. Desde este punto de vista, la frecuencia se desfasa debido al paso de la luz difusa a través de las partículas, es lo que conocemos como desfase Doppler. Si el flujo es perpendicular al límite, la relación entre esta frecuencia f_d , y la velocidad v_x se determina por el ángulo 2θ entre las dos intersecciones de los rayos y la longitud de onda del laser, λ_0 :

$$f_d \approx 2 \sin \theta \frac{v_x}{\lambda_0}$$

La tecnología LDA ofrece numerosas ventajas con respecto a otras técnicas. No hay, por ejemplo, necesidad de contacto físico con el flujo, por lo que no existirán perturbaciones

en este. Además, esta técnica puede estar aplicada a flujos muy reactivos o extremadamente calientes. Estas características entre otras, hacen del LDA un preciado útil de medida con numerosas aplicaciones. La relación señal/ruido del LDA depende directamente de la potencia del laser, del ángulo de la óptica y del diámetro de las partículas, entre otros parámetros. Estos tres parámetros pueden ser ajustados. La intensidad de la dispersión de las partículas depende fuertemente del ángulo de observación.

Normalmente, por razones prácticas, el modo de recepción de retrodifusión óptica está asociado con la transmisión óptica utilizada. La frecuencia de las extracciones depende de la frecuencia de llegada de las partículas y la medida de volumen. La señal es entonces el tiempo de la serie (figuras 4 y 5) con selección aleatoria (distribución de Poisson) de los intervalos del tiempo entre las muestras (figura 6) y al mismo tiempo, favorece la velocidad elevada de las partículas. Los intervalos aleatorios permiten la utilización del análisis de las series cronológicas no aplicables a LDA dadas. El sesgo puede ser eliminado de los datos utilizando el tiempo de estancia (tiempo a través del volumen de la partícula) de ponderación de los datos. Esto permite el análisis de los datos estadísticos comunes a la velocidad.

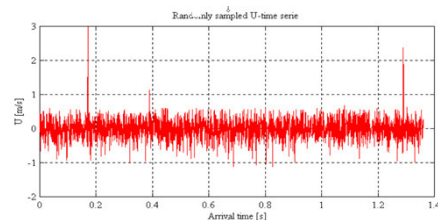


Figura 4 : Series temporales de la velocidad instantánea medida a partir de un flujo turbulento.

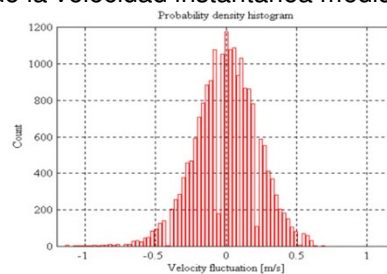


Figura 5 : Función de densidad de probabilidad para estimar la velocidad de las series.

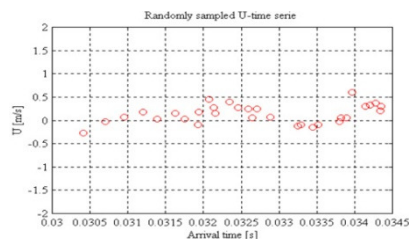
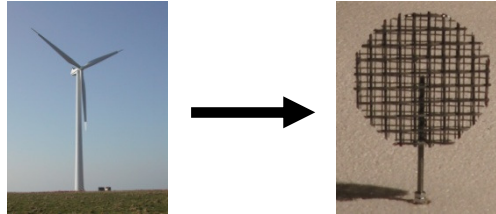


Figura 6 : Serie temporal aleatoria que indica el tiempo de llegada de las muestras.

2.3. MODELIZACIÓN DE LOS AEROGENERADORES.

Los aerogeneradores modelizados son los Neg Micon NM52/900. La altura del mástil es de 49 metros y el diámetro del rotor es de 52 metros. La potencia nominal de este tipo de aerogeneradores es de 900 kw.

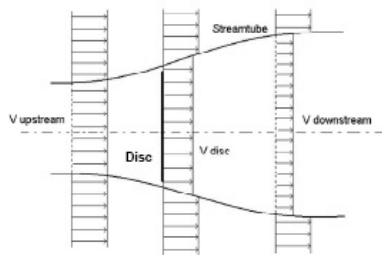
Por razones prácticas los aerogeneradores se modelizarán a escala 1:600, por lo que trataremos con una maqueta de una altura de 82 mm y cuyo diámetro tendrá 87 mm.



El mástil de nuestra maqueta se modelizará por una varilla roscada de 4 mm de diámetro. El rotor consta de una superposición de mallados metálicos elegidos acorde con los test preliminares en el túnel de viento.

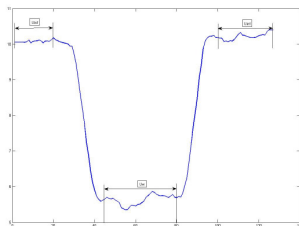
2.4. DETERMINACIÓN DEL MALLADO UTILIZADO

Un aerogenerador puede ser modelizado por un disco poroso. El disco poroso reproduce la misma estela que un aerogenerador en un punto de funcionamiento concreto.



$$a = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{V_{down}}{V_{up}} \right)$$

Para modelizar los aerogeneradores, se ha utilizado un modelo a escala. El modelo utilizado se ha obtenido de la publicación siguiente [Physical modelling of the far wake from wind turbines. Application to wind turbine interactions]¹. Nos basaremos en el coeficiente α , factor de carga, para saber si estamos trabajando sobre el punto adecuado. Estudiaremos diferentes grosores de mallados hasta conseguir el que se ajuste más a nuestras expectativas. Con el fin de encontrar el factor de carga, utilizaremos el perfil de velocidad a una distancia del doble de un diámetro por detrás de nuestro modelo, calcularemos la velocidad media en ese punto, $U_w = 5.63 m/s$ y calcularemos la velocidad media en el infinito: $U_{INF} = 10.15 m/s$.



$$a = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{U_w}{U_{INF}} \right) \approx 0.223$$

3. CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO.

3.1. EVOLUCIÓN DEL FLUJO EN EL TUNEL DE VIENTO.

3.1.1. MEJORAS APORTADAS AL TUNEL DE VIENTO.

El entorno del túnel de viento donde vamos a efectuar los ensayos es ligeramente divergente por lo que la velocidad disminuirá dependiendo de su posición en el vano. Para reducir este fenómeno, hemos situado unos paneles de madera a lo largo de dicho vano.

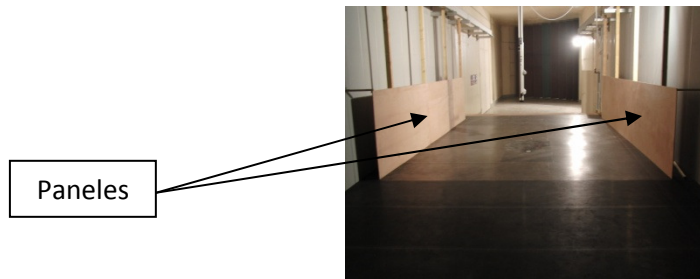


Figura 7 : Paneles de madera a lo largo de la dirección del flujo.

3.1.2. FLUJO SIN LA MAQUETA.

El flujo del fluido sobre en nuestro túnel de viento no es constante. Un estudio de las variaciones se necesita para corregir las medidas con el fin de hacer una comparación entre ellos. Realizaremos medidas de la velocidad en dirección al flujo y también en dirección transversal a este. Con ello veremos si, efectivamente, los paneles de madera mejoran el flujo a través de nuestro túnel de viento.

-Medidas Longitudinales:

El gráfico que encontramos a continuación muestra la evolución de la velocidad longitudinal en el vano de ensayo. La curva roja muestra la velocidad a 800 mm de altura mientras que la curva azul se ha medido a 400 mm de altura.

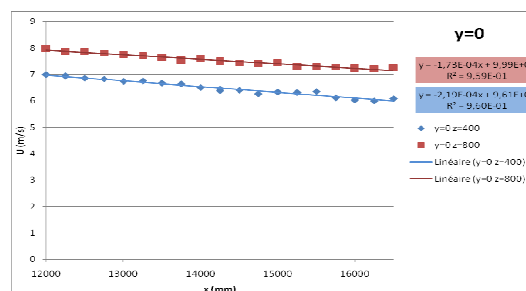


Figura 8 : Medida de la velocidad longitudinal.

Cabe destacar que la velocidad decrece linealmente en función de la posición en el vano. Si observamos las líneas de tendencia, veremos como la pérdida de velocidad a 800 mm es de $0,17 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})/\text{m}$ mientras que a 400 mm es de $0,22 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})/\text{m}$. Antes de situar los paneles la pérdida de velocidad era de $0,45 \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})/\text{m}$ a 300 mm de altura.

-Medidas Transversales

A continuación se muestra la evolución de la velocidad transversal. De la misma manera que con anterioridad, la curva roja corresponderá con las medidas a 800 mm mientras que la azul con aquellas tomadas a 400 mm de altura.

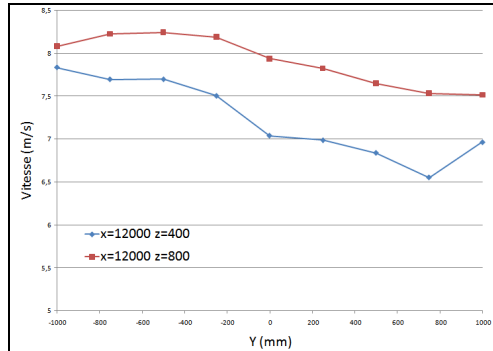


Figure 9 : Medida de la velocidad transversal

3.1.3. FLUJO CON LA MAQUETA MONTADA.



Figura 10 : Foto de la maqueta.

La velocidad una vez situada la maqueta se va a ver perturbada por esta. Por ello se ha medido la velocidad del flujo a 49 m (altura de nuestro aerogenerador) y a 180 m.

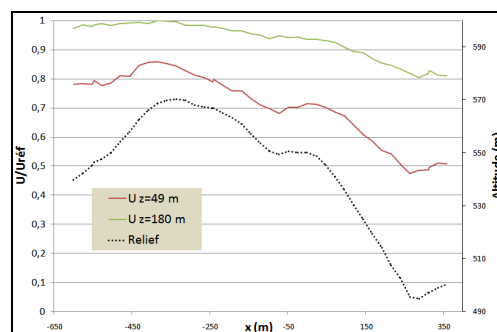


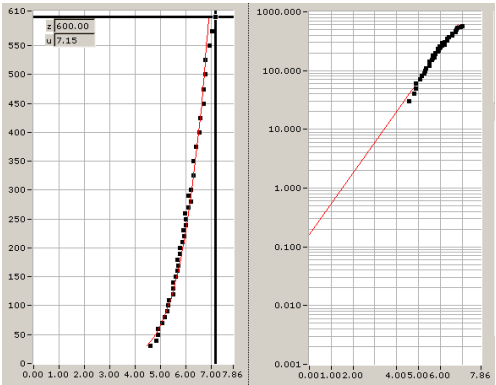
Figure 11 : Mesure de la vitesse longitudinale avec la maquette

Podemos observar como a medida que nos acercamos al nivel del relieve, más se verá perturbada la velocidad del flujo estudiado.

3.2. LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA

3.2.1. LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA

La determinación de la capa límite atmosférica del vano de ensayo es una etapa muy importante. De hecho, las medidas nos permitirán conocer la rugosidad del túnel de viento. La longitud de la rugosidad (z_0) y el coeficiente α se determinan a partir de un perfil vertical de velocidad. Vamos a medir un perfil vertical por cada posición de los aerogeneradores con y sin la maqueta. Con el software PROFIT determinaremos los coeficientes a partir de los perfiles.



Type of terrain	z_0 (m)	α
Smooth terrain (sea, snow)	10^{-5} to $5 \cdot 10^{-3}$	0,08 to 0,12
Moderately rough (farmland, few trees)	$5 \cdot 10^{-3}$ to 10^{-1}	0,12 to 0,18
Rough (small town, suburbs)	0,1 to 0,5	0,18 to 0,24
Very rough (City centre, forest)	0,5 to 2	0,24 to 0,4

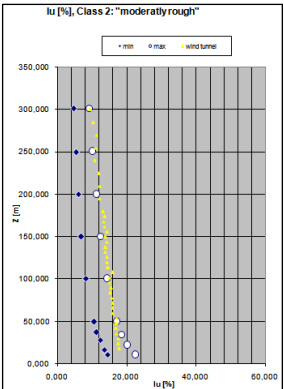
	Sans la maquette			Avec la maquette		
	E1	E2	E3	E1	E2	E3
Z_0 (m)	0,1	0,06	0,05	0,47	0,14	0,71
Alpha	0,13	0,14	0,13	0,18	0,16	0,24

Figure 12 : Perfil vertical de la velocidad en el software PROFIT y datos obtenidos.

La rugosidad obtenida del túnel de viento es: “Moderadamente rugoso”.

3.2.2. INTENSIDAD DE LA TURBULENCIA.

Buscamos ahora conocer la intensidad de la turbulencia en el vano de ensayo.



	Sans la maquette			Avec la maquette		
	E1	E2	E3	E1	E2	E3
lu (%)	17,1	17	17,4	20,5	19,4	20,5
lv (%)	12,3	13,2	12	12,2	12,4	14,6
lw (%)	7,9	8	8,5	11,4	10,1	10,6

Figura 13 : Intensidad de la turbulencia en el aerogenerador 1

4. DESCRIPCIÓN DE LAS MEDIDAS.

La velocidad será medida vertical y horizontalmente por detrás de cada uno de los aerogeneradores. Realizaremos tres series de medidas detrás de cada aerogenerador. El esquema que se muestra más abajo será el que se siga para ello.

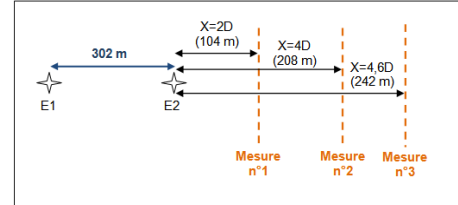
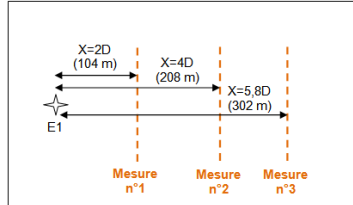


Figura 14 : Medida detrás del aerogenerador 1 Figure 15 : Medida detrás del aerogenerador 2

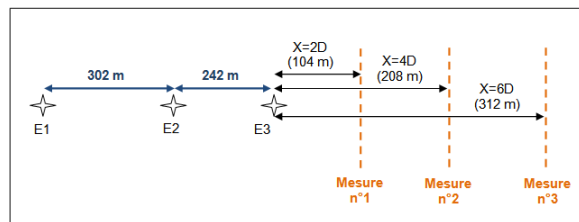


Figure 16 : Medida detrás del aerogenerador 3

5. INTERACCIONES DE LAS ESTELAS DE LOS AEROGENERADORES SIN LA MAQUETA.

5.1. PERFIL VERTICAL.

Para caracterizar los perfiles verticales, medimos a 12 metros del suelo. Se tomarán medidas hasta los 180 metros del suelo, donde la velocidad se estabiliza. A continuación se muestra la evolución de la velocidad detrás de cada aerogenerador a una distancia de 0, 2, 4 y 6 diámetros.

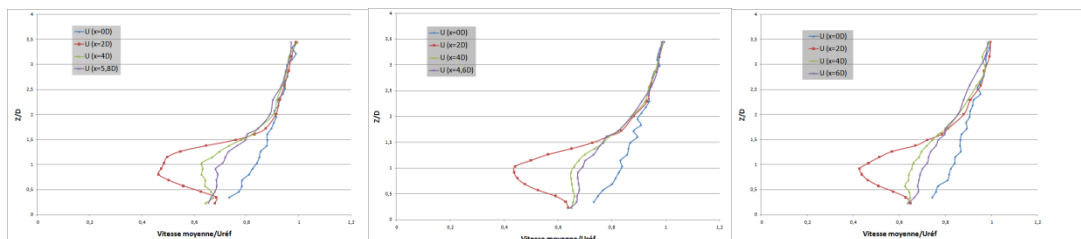


Figura 17 : Perfiles verticales detrás de los aerogeneradores 1,2 y 3.

Dos puntos importantes han de ser comentados. En primer lugar la diferencia entre 2D y 4D del primer aerogenerador es más gran que la diferencia entre los otros, esto se debe a que la velocidad en los dos últimos aerogeneradores es menor que en el primero y por tanto la turbulencia por detrás del primero será mayor que en los otros. En segundo lugar, podemos observar como la altura a la cual los cuatro perfiles de velocidad se estabilizan va

evolucionando para cada aerogenerador, esto se debe a que la estela de cada aerogenerador va en aumento a su paso por el siguiente.

5.2. PERFIL HORIZONTAL.

De la misma manera que anteriormente, elegimos un rango adecuado para ver la evolución de la estela detrás de cada aerogenerador. La anchura barrida será algo más de 2D más allá de cada lado del disco. A continuación se muestra la evolución de la velocidad detrás de cada aerogenerador a una distancia de 0, 2, 4 y 6 diámetros.

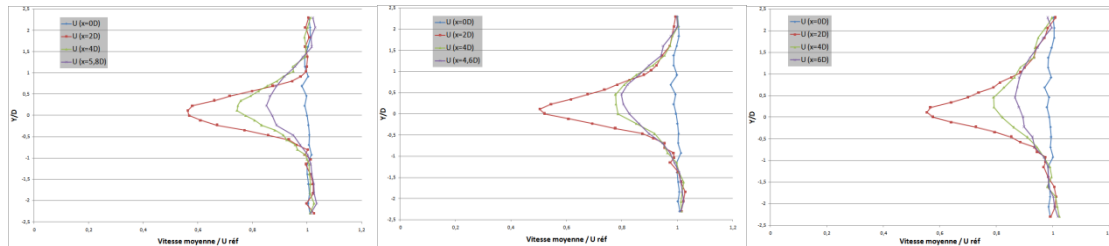


Figura 18 : Perfiles horizontales detrás de los aerogeneradores 1, 2 y 3.

Vemos como entre los perfiles 2D y 4D se pueden observar los mismos sucesos que en los perfiles verticales.

6. INTERACCIÓN DE LAS ESTELAS DE LOS AEROGENERADORES EN PRESENCIA DE UN RELIEVE.

6.1. PERFIL VERTICAL.

Ahora estudiaremos los perfiles verticales tras los aerogeneradores en presencia de un relieve, las diferentes curvas, como ocurría anteriormente, corresponden con las medidas sobre el aerogenerador, a 2D, 4D y 6D en cada caso.

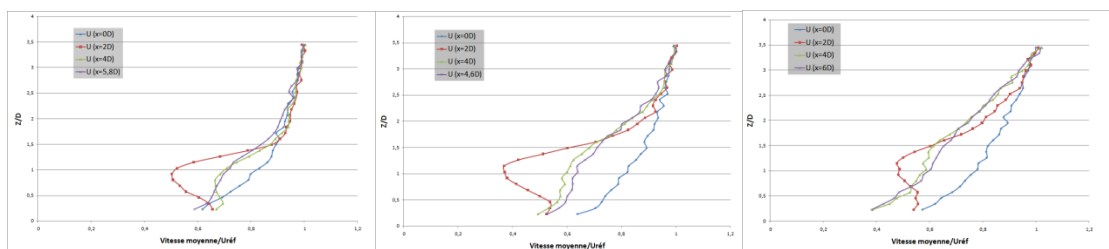


Figure 19 : Perfiles verticales detrás de los aerogeneradores 1,2 y 3.

Podemos observar como el déficit de velocidad disminuye conforme nos alejamos de cada aerogenerador y cómo en la posición a 6D de los aerogeneradores posteriores, todavía se puede apreciar el efecto de los anteriores.

6.2. PERFIL TRANSVERSAL.

A continuación, de la misma manera que se hizo en los perfiles verticales en presencia de un relieve, estudiamos los perfiles horizontales.

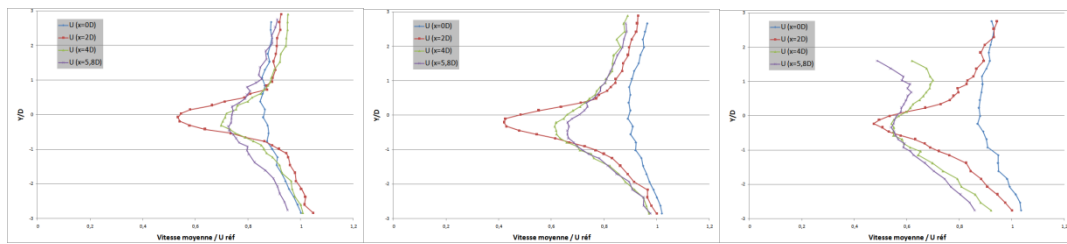


Figura 20 : Perfiles horizontales detrás de los aerogeneradores 1, 2 y 3.

En el caso del aerogenerador 3, se ve claramente como la orografía de nuestro relieve repercute en el perfil de velocidad, lo que en el caso sin relieve era un perfil prácticamente simétrico ahora no lo es.

7. COMPARACIÓN CON Y SIN MAQUETA.

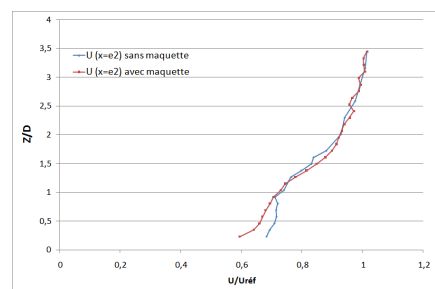


Figura 21 : Perfil tras el aerogenerador 1, en posición del aerogenerador 2, con y sin maqueta.

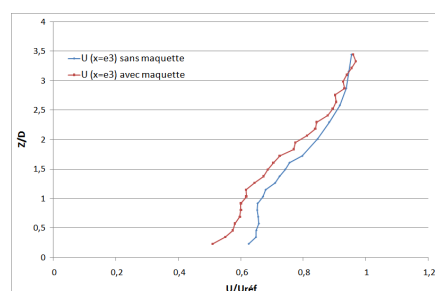


Figura 22 : Perfil tras el aerogenerador 2, en posición del aerogenerador 3, con y sin maqueta.

Con estos gráficos se pretende mostrar cómo a medida que estudiamos el perfil de un aerogenerador más alejado del primero y si además añadimos los cambios que el relieve producen, observamos que el perfil de velocidad es menor en cada caso en que se añade cada una de estas características siendo esto en detrimento de la energía que los aerogeneradores producirán.